

沈降天秤法と比重計法の組合せによる泥質砂堆積物の粒度分析法

岸 誠一*・公文富士夫*

Grain-size analysis combined settling tube method with hydrometer method for muddy sand sediments

Masakazu KISHI* and Fujio KUMON*

Grain-size analysis of muddy sand or sandy mud is a matter of trouble, because the sediments abundantly include both sand and clay grain size which behave differently in principle. The analysis by a single method needs a very long time and/or a large labor for one specimen.

The new procedure proposed here is a combination of a settling tube method for sandy fractions and a hydrometer method for muddy fractions. The hydrometer analysis is performed according to an ordinary procedure. Then wash the sample on a 4.5-phi standard sieve. Dry the fractions rested on the sieve, and weigh it. After then, analyze the coarse fractions by a settling tube method. The settling tube method is a newly-formed system which uses an electric balance and a computer. Make the two cumulative frequency curves, and combine them by calculation. Theoretically, both curves should fit at 4.0 phi of settling-size grade, on the basis of the detailed research of effects by 4.5-phi sieving. Both curves, however, often differ slightly at 4.0 phi. Therefore, they are shifted to each other at 4.0-phi grade by changing the total weight of the used sample, namely "weight correction". This procedure takes 4 days to analyze 15 samples from coarse-grained sand to clay.

Key words: grain-size analysis, hydrometer, settling tube, sieving, weight correction.

はじめに

碎屑性堆積物の粒度特性は、堆積プロセスや堆積環境の指標として重要な情報であり、その分析方法については様々な提案がなされ、分析が行われている。これらの方法は原理的に2種類に分けられる。1つは、フルイ分け法・顕微鏡法に代表されるような、粒子の幾何学的な粒径を測定するもの、もう1つは、ピペット法・比重計法・沈降天秤法・エメリー管法・光透過法などに代表されるような、粒子の沈降速度を利用して粒径を測定するもの(沈降法)である。これらの分析法は、それぞれ特有の性質があるため、粒度の幅の広い堆積物について比較的迅速に分析するという点では

大きな問題を残している。特に、三角州堆積物にしばしば出現する泥質砂～砂質泥のような、粒度が広い範囲にわたる堆積物の粒度分析を1つの方法のみで行うことは困難である。このため、比較的手軽に扱えるという観点から、エメリー管法とピペット法(佐藤・奈須, 1956)、フルイ分け法と光透過法(森山, 1976)、フルイ分け法と比重計法(斎藤, 1985; 公文ほか, 1992)、エメリー管法と光透過法(保柳ほか, 1991)などのような2種類の方法を組合せて、砂質部から泥質部まで分析する方法が提案されている。しかし、これらは、粗粒部と細粒部で原理の異なる分析方法を用いたり、同一原理であっても、粗粒部と細粒部に試料を分割する際に用いるフルイの影響が充分考慮されていないといった問題をもっている。

砂から粘土までの粒度分布範囲をもつ泥質砂堆積物や砂質泥堆積物の粒度分析を行う場合、このような問

1992年11月28日受付, 1992年12月21日受理。

*信州大学理学部地質学教室, Department of Geology, Faculty of Science, Shinshu University, Matsumoto 309, Japan.

題点を少しでも解決して分析を行うことが、より正確な粒度分布を知る上で必要である。本報告では、粗粒部には沈降天秤法、細粒部には比重計法を適用することによって、測定原理を沈降法で統一し、フルイによる粗粒部と細粒部の試料分割の影響を考慮した上で両者をつなぎ合わせるという手法を提案する。この手法は、15個の試料を分析する場合、比重計法による分析にはほぼ3日間(ただし、脱塩処理や有機物分解などの前処理を除く)、沈降天秤法による分析にはほぼ半日間の時間を要するが、比較的短時間に同一原理で極粗粒砂から粘土まで、高い精度で分析できるという点ですぐれた方法である。

沈降天秤法と分析装置

沈降天秤法は粒子の沈降速度から粒径を求める分析法である。今回用いた分析装置は、筑波大学地球科学系の松本栄次氏が考察し、Marui *et al.* (1984)、伊勢屋(1985)を参考に新しく製作されたもので、内径14cm、長さ190cmの透明アクリル製の沈降管、電子上皿天秤、試料受け皿、天秤と受け皿を接続するワイヤロープ、試料投入板で構成されている(第1図)。粒径と沈降速度との関係を与える式は伊勢屋(1985)にならない、Gibbs *et al.* (1971)によって提案された式を用いている。この式は、0.02~5mmのガラスの球形粒子の沈降実験から求めた経験式で、6mm以下の粒子に有効であるとされている。

試料の沈降距離は50~170cmまで変更が可能である。均質な温度の水を沈降管内に満たし、表面から初速がつかないように試料を投入する。沈降していく粒子を試料受け皿で受けて、その重量の時間変化を電子上皿天秤で測定することによって粒度分析が行われる。測定する粒度の範囲および粒度の間隔は、プログラム上で任意に変更が可能である。測定時間は水温によって異なるが、18℃のときには4.5φまでで約15分である(1試料)。測定結果は、測定終了時の重量を100%として各粒度階(階級分けは任意に変更が可能)ごとに累積重量%で表される。また、測定精度は天秤の測定精度に依存していて、この分析装置では0.001gである。

分析装置の特性

分析装置の特性を知るために、細粒砂の粒径に相当するガラスビーズを用いて、フルイ分けおよび顕微鏡による測定と沈降天秤法との比較を行った(第2図)。使用したガラスビーズは(株)井内盛栄堂の規格品であ



第1図 沈降天秤法の粒度分析システム。

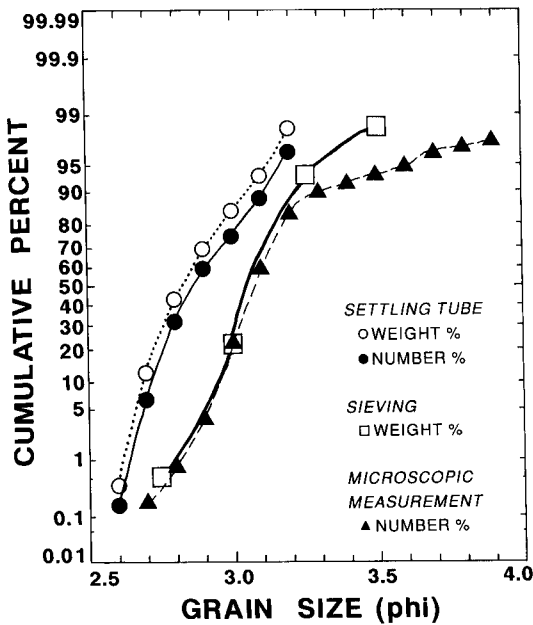
Fig. 1. Photograph of the settling tube system for sand-size analysis.

るが、粒度にかなりのばらつきがあるため、2.75φと3.00φの標準フルイを用いておおよぼに粒度を揃えたものを用いた。比重ピンを用いて求めたガラスビーズの比重は3回の測定の平均で2.51g/cm³であった。

フルイ分けによる測定は、ガラスビーズ試料から約20gの試料を分取して、0.25φ間隔の標準フルイを使い、電磁式フルイ振盪機を用いて乾式で15分間篩ったものである。結果は第2図に重量比で表した。

顕微鏡による測定は、ガラスビーズをプレパラートに封入した試料を作り、顕微鏡の接眼レンズの目盛りを使用して粒子の大きさを測定したもので、測定誤差は0.001mm程度であった。ガラスビーズの中には2つの粒子が接合して団子状やダルマ状になったものも含まれるが、90%以上がほぼ完全な球形であった。顕微鏡による測定では鏡下で認められた粒子の大きさを順次測定していくという方法をとったため、粒度分布は個数比で表される。測定総数は552個であった。

沈降天秤法による測定は、沈降距離を150cmに設定



第2図 沈降天秤法、フルイ分け法および顕微鏡測定法の粒度分析値の比較。試料はガラスビーズ。
 Fig. 2. Comparison of the settling tube analysis with sieving and microscopic measurements for glass beads.

して、1~2g量のガラスビーズを試料投入板に水で接着し、初速を与えないように投入して分析を行った。沈降天秤法の測定結果は重量比で表されるため、顕微鏡による測定の結果との比較のためには個数比に換算する必要がある。重量比は、ガラスビーズの比重が一定であるとすると体積比で表すことができる。全ての粒子が球であると仮定し、各粒度階の中間値を用いて個数比に換算した結果もあわせて第2図に示した。個数比に換算した測定結果は、重量比の測定結果に比べてわずかに細粒となっているだけである。

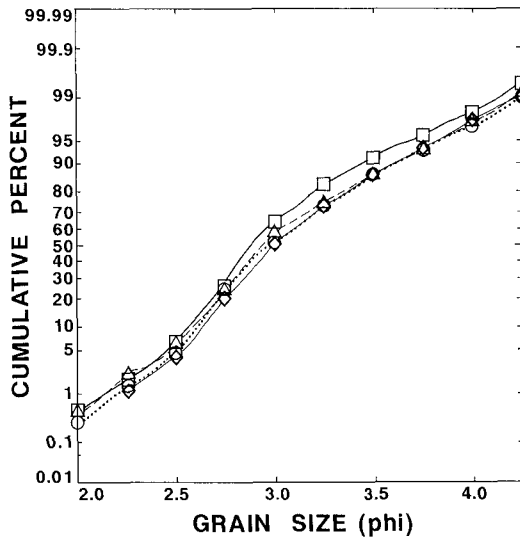
フルイ分けと顕微鏡による測定の結果は、フルイ分析での測定間隔が大きくならざるを得ないことを考慮すると良く一致している。顕微鏡による測定に細粒な粒子の割合がやや多い原因は、測定の際に小さい粒子を多く数えがちであったためである。一方、沈降天秤法による測定の結果は、フルイ分けや顕微鏡による測定の結果に比べ最大で0.27φ粗いものがみられた(中央値の比較)。沈降天秤法の粒度が実際よりも粗く測定される原因としては、試料投入直後に沈降管の上部で起きている渦流の影響が考えられる。この渦流のために粒子の沈降速度が大きくなり、径が大きめに測定

される可能性が考えられる。これに関しては、試料投入時に初速をなるべくつけないように熟練することや、沈降管内の水温を均質に保つために汲み置きした水を使用することで多少とも改善が認められたが、それでも11回の分析の平均で0.22φほど顕微鏡による測定より粗いという結果となった。

このような相違の原因の1つとして、粒子が集団で沈降する場合の集団の効果が考えられる。なぜなら、粒径の計算に用いているGibbs *et al.* (1971)の沈降式は、1個の粒子の沈降速度に基づいているからである。しかし、ここで用いているような大きな径の沈降管では集団の効果は小さなものであり、標準偏差で8%以内の速度の差しか生じないと報告されている(Gibbs, 1972)。この8%の沈降速度の増加は、いま検討している粒度付近では0.02φ程度の粒度の粗粒化をもたらすだけで、前述の0.2φの差の原因としては小さすぎる。また、小さな粒子が大きな粒子に引きずられて沈降するために実際よりも粗い測定結果となるという可能性(Lindholm, 1987)も考えられる。このことは、沈降天秤法の分析結果に細粒部の割合が少ないことを説明するかもしれないが、主体をなす部分の粒度の差を説明することにはならないと思われる。電子上皿天秤から計算機への出力に時間的遅れが生ずることも考えられるが、その遅れは粒度を小さくする方向に働くはずである。ここで仮に1秒の遅れが生じたとしても、今回の分析条件では計算上0.02φ程度の差しか生じない。

沈降天秤法と2つの幾何学的な粒度分析法との間には、0.2φほどの違いがあった。粒子は球形であるから理論的には三者は一致するはずである。その差の原因を前述のようにいくつか検討したが、はっきりとした結論は得られていない。Gibbs *et al.* (1971)の計算式に問題があるということも考えられるかもしれない。しかし、0.2φという差は小さなものであり、この沈降天秤法の分析装置は、沈降法の原理に基づいて粒度分析がほぼ正しく行われていると考えて良いであろう。

また、沈降天秤法では供給する試料重量が1~2gと少量ですむが、その測定結果が試料全体の粒度分布を正しく代表しているかどうか問題となる。そこで、同一試料を分割して得られた4つの試料について比較を行った。試料は千葉県木更津市泉谷に分布する更新統下総層群の地蔵堂層の泥質砂を用いた。試料を4.5φのフルイの上で十分に水洗いし、それを乾燥することによって得られたものについて半割を繰り返して1



第3図 母集団から分取した少量の試料についての沈降天秤法による分析が母集団の粒度分布を示す試験。同一試料を分割して得た4つの試料の描く累積頻度曲線は良く似ている。

Fig. 3. A test analysis of a small amount sample partitioned into a population. Four samples subdivided from a specimen have similar cumulative frequency curves.

～2gの試料を4つ得た。分割した4つの試料の分析の結果は良く一致する(第3図)。このことから、分割によって得た少量の試料についての分析が試料全体の粒度分布を反映していると考えて良いことがわかる。

比重計法

比重計法は、一定の時間ごとに、比重計を用いてある深度の懸濁液の比重を測定することによって、供給試料重量に対するその粒径値までの通過の割合を求めて、粒度分布を知る分析法である。分析の手順等はJIS A1204に規定されており(土質工学会, 1979), 基本的にはその方法に従って分析を行った。

しかし、泥質試料は、その前処理の違い(試料の分解・分散)によって分析値に差が生じることが知られている(Nelsen, 1983; 公文, 1990)。そこで、公文(1990)・公文ほか(1992)に従って、有機物の分解、超音波洗浄器による15分間の分散およびヘキサメタリン酸ナトリウムによる分散を行った。なお、4.0～9.0φの範囲を約0.5φ間隔で分析するために、測定開始より1, 2, 5, 15, 30, 60, 120, 240, 480, 1440分後に比重計による測定を行った。比重計法による分析

の終了した試料は、4.5φの標準フルイ上で充分に水洗いし、フルイに残った粗粒部を乾燥させて秤量した後沈降天秤法に用いた。

沈降天秤法と比重計法のつなぎ合わせ

フルイ分けの影響

沈降天秤法や比重計法による粒度分析は沈降法の一つで、フルイ分け法による粒度分析とは原理的に異なっている。前述のように、比重計法で測定した試料を沈降天秤法に移す前に、便宜的に4.5φのフルイを用いて粗粒部を集める操作を行う。このため、フルイで試料を分割するときの影響を検討する。

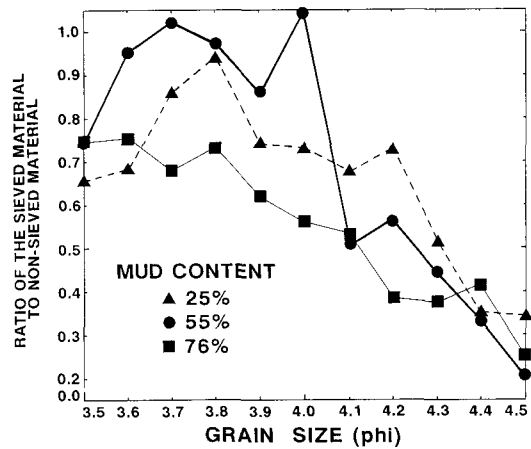
Kommar and Cui(1984)は、砂質堆積物についてフルイ分け法と沈降法を比較し、両者をそれぞれ中間径に変換することによって統一的な比較が可能であることを示した。これによると、フルイ分け法による分析は沈降法による分析に比べて0.4φほど粗粒であると結論づけている。すなわち、彼らの理論が正しいとすると、4.5φのフルイを用いて分割したときには、フルイ上には4.1φの沈降径に相当する大きさより粗い粒子が残留しているはずである。しかし、Kommar and Cui(1984)の結論は粒子の形態に依存するため常に適用できる訳ではない。また、実際には4.5φのフルイを用いて水洗いを行っているため、フルイの目づまりや微細粒子の吸着によって、本来通過すべき細粒な粒子もある程度含まれていることが予想される。そのため、4.5φのフルイ上に残った試料に、どの程度細粒な粒子が含まれているかという点をまず検討した。

あらかじめ泥分含有率(4.0φより細粒な泥質分の比率)を測定しておいた地蔵堂層の2試料(泥分含有率76%, 25%)について、4.5φのフルイの上で充分水洗いした試料を乾燥させた後に沈降天秤法によって測定した。測定は5.0φまで行ったが、泥分含有率76%の試料は4.9φまでに、泥分含有率25%の試料は4.6φまでに粒子がすべて沈降しきるのが確認された。また、4.5φまでに沈降した累積重量%はそれぞれ99.71%, 99.84%であった。このことから、4.5φのフルイによって分割した粗粒部の試料は、沈降径で4.5φに相当する部分まで測定をすれば、99%以上が沈降していることが確認された。従って、4.5φのフルイ上で水洗いすることによって分割した試料の、粗粒な部分における各粒度階の相対的比率は、4.5φに相当する沈降径までの測定によって正しく求められることがわかる。

つぎに、4.5φのフルイを用いることの影響がどの

粒径にまで及ぶかという問題を、前述の地蔵堂層から採取した泥分含有率の異なる3試料(泥分含有率76%, 55%, 25%)を用いて検討した。試料はそれぞれ2つに分け、片方はそのまま沈降天秤法で測定し、もう片方は4.5φのフルイで水洗いした後に乾燥させて沈降天秤法で測定した。前者は4.5φの沈降径に相当する粒径まで測定し、その累積重量を100%として、粒径3.5φから4.5φにかけて0.1φごとの粒度階の比率を求めた。後者も4.5φの沈降径に相当する粒径まで測定し、その累積重量を100%として、同様に粒径3.5φから4.5φの間でそれぞれの比率を求めた。そして、3.5~4.5φの各粒度階ごとに後者の前者に対する比(フルイによる分割を行った試料の重量%/分割を行わなかった試料の重量%)を求めた。フルイによる分割を行わなかった試料の総重量には、4.5φの沈降径よりも粗い粒子がすべて入っており、また、それぞれの粒度階にも欠損はないはずである。一方、フルイによる分割を行った試料には、4.5φのフルイに残った試料に4.5φの沈降径よりも粗い粒子がすべて含まれている訳ではなく、ある粒度階よりも細粒な部分ではフルイ分けの影響によってその粒度階の試料の一部分が失われているはずである。両者では分母にあたる総重量に違いがあるので、両者の比率を直接に比較することには問題があるが、0.1φの粒度階ごとに両者の比をとり、その値が大きく低下する粒度を知ることによって、4.5φのフルイを使った影響が顕著に現れる粒径を推定することができる(第4図)。泥分含有率76%の試料は4.1~4.2φにかけて、最も大きな割合で比率が0.53~0.38へ低下する点がみられる。泥分含有率55%の試料は4.0~4.1φにかけて比率が1.04から0.52へと極端に低下する点が、泥分含有率25%の試料は4.2~4.3φにかけて比率が0.73~0.51へ低下する点がみられる。また、いずれの試料も、これらの比率が急激に低下する粒度より細粒部ではさらに比率が小さいことが認められる。このことから、4.5φのフルイを用いることによる影響が顕著に現れる粒径は、泥分含有率76%の試料で4.1~4.2φ、泥分含有率55%の試料で4.0~4.1φ、泥分含有率25%の試料で4.2~4.3φの沈降径と推定できる。

これらの結果と Kommar and Cui(1984)の結論からみて、沈降径で4.0φまでの部分であれば、4.5φのフルイ操作の影響はかなり小さいと考えられる。つまり、4.0φの沈降径よりも粗粒な粒子は4.5φのフルイ操作によってほとんど失われておらず、4.5φのフルイに残留した試料にすべて含まれていると考えられる。



第4図 4.5φの標準フルイによってフルイ分けたことの影響の検討。フルイ分けを行わない試料に対するフルイ分けを行った試料の割合が4.0~4.3φ付近で大きく低下することが認められる。

Fig. 4. Effect of the 4.5-phi sieving separation on settling tube analysis for sandy sediments. Ratio of frequency of the sieved material to non-sieved material in each 0.1 phi interval decreased rapidly at 4.0-4.3 phi grade.

以上のことから、沈降天秤法による分析で得られた頻度分布に4.5φのフルイに残った試料の重量を乗ずれば、4.0φよりも粗い部分の各粒度階ごとの正確な重量がほぼ正しく求まることになる。

つなぎ合わせ

前述のような検討から、比重計法による分析が終了した試料を4.5φのフルイを用いて水洗いで篩い、フルイに残った試料を乾燥、秤量後沈降天秤法で分析することで、4.0φまでの粒度分布を正確に算出できることがわかる。比重計法では4.5φ前後より細粒な部分が分析できるので、両者を算術的につなぎ合わせれば、沈降法として一貫した分析結果が得られることになる。しかし、実際の分析結果では両者の接合部にギャップが生ずることがしばしば認められる。例えば、東京湾東部に位置する小櫃川三角州の堆積物についての分析では、4.0~4.5φの粒度においては、沈降天秤法による粒度分析の累積曲線が比重計による累積曲線よりもやや上の位置に分布する傾向が認められた。

フルイ分け法と比重計法を組合せて粒度分析を行う場合、両手法の境界のギャップをなくするために、4.5φにおける両者の累積頻度値が一致するように計算上、供給重量を変化させることが行われており「重

量補正」と呼んでいる(公文ほか, 1992)。比重計法における分析試料の供給重量は, 試料の一部の含水比を測定することによって, 既知の湿潤重量から計算によって求めており, 真の供給重量は未知である。このことから, フルイ分け法と比重計法との境界のギャップを放置しておくよりは, 供給重量の推定に誤差があると仮定して両者をスムーズにつなぎ合わせる方が真の粒度分布をより正確に反映しているだろうとの判断に基づいて重量補正を行っている。

同様な考え方で, 4.0ϕ における累積重量%の値が沈降天秤法と比重計法とで一致するように重量補正を行った。具体的には, 比重計法による分析に供給した試料の推定供給重量を 0.01g づつ変化させて計算を繰り返し, 4.0ϕ における両者の累積頻度値が一致したところで計算を終了させた。推定供給重量値と重量補正後の供給重量値との差を推定供給重量値で割った値(百分率)を「補正率」として計算し, 重量補正の度合の指標とした。このような重量補正を行うことによって, 沈降天秤法と比重計法とを組合せたなめらかな累積頻度曲線を描くことができた。もちろん重量補正を行わないという考え方もありうる。その場合でも, 沈降天秤法の分析値の 4.0ϕ から比重計法の分析値へつないでいく点が重要である。

問題点と今後の課題

沈降天秤法と比重計法の組合せによって, 泥質砂や砂質泥といった砂と泥の中間の粒度分布をもつ堆積物に有効な粒度分析法を提案した。具体的には, 通常比重計法による粒度分析を行った後, その試料を 4.5ϕ のフルイの上でよく水洗いし, フルイに残った試料を乾燥・秤量後, 沈降天秤法で粒度分析をする。そして, 4.0ϕ における累積頻度値が両者の方法で一致するように重量補正を行う。細粒部の分析と粗粒部の分析に同じ沈降法を用い, 便宜的に行う 4.5ϕ のフルイによる試料分割の影響を考慮して 4.0ϕ の粒度で両者をつなぎ合わせたことにより, 理論的には正確な粒度分布を求めることが可能になったと考えられる。

しかし, 今回提案した分析法を用いた小櫃川三角州の堆積物207試料の分析結果では, 補正率がプラスの補正を示す場合が多く $-3\sim+10\%$ であった。測定誤差であれば補正率がプラスやマイナスにばらつくことが考えられるので, この偏りは何らかの原因によるものと思われる。小櫃川三角州の堆積物のもつ特性が反映したものという可能性もあるが, 今回用いた沈降天秤法による分析装置が, ガラスビーズを用いた試験で,

フルイや顕微鏡による測定よりも 0.2ϕ ほど粗粒となっている結果との関わりも検討を要する。つまり, 沈降天秤法による測定結果が本来よりも粗く, その分だけプラスの重量補正が必要となったという可能性である。しかし, 現状ではその原因の解明には至っておらず, 今後の詳しい検討が必要である。

謝辞 本論文をまとめるにあたり, 上武大学の伊勢屋ふじこ先生, 信州大学の保柳康一先生には原稿を読んでもいただき, かつ有益なご意見をいただいた。こころより感謝いたします。

文 献

- 土質工学会, 1979: 土質試験法。日本土質工学会, 757p.
- GIBBS, R. J., 1972: The accuracy of particle-size analyses utilizing settling tubes. *J. Sed. Petrol.*, **42**, 141-145.
- GIBBS, R. J., MATTHEWS, M. D. and LINK, D. A., 1971: The relationship between sphere size and settling velocity. *J. Sed. Petrol.*, **41**, 7-18.
- 保柳康一・高野 修・西村瑞恵・岸 誠一, 1991: 堆積構造との関連を検討するための幅広い粒度組成試料の分析法—エメリー管と光透過法の組合せによる粒度分析例—。堆積学研究会報, **35**, 69-76.
- 伊勢屋ふじこ, 1985: 沈降式粒度分析の手引き。筑波大学水理実験センター報告, **9**, 115-128.
- KOMMAR, P. D. and CUI, B., 1984: The analysis of grain-size measurements by sieving and settling-tube techniques. *J. Sed. Petrol.*, **54**, 603-614.
- 公文富士夫, 1990: 泥質堆積物の粒度分析における超音波篩分法と比重計法の比較。堆積学研究会報, **33**, 57-61.
- 公文富士夫・紙谷敏夫・須藤浩一・井内美郎, 1992: 琵琶湖湖底堆積物の粒度分布と堆積機構。地質学論集, **39**, 印刷中。
- LINDHOLM, R. C., 1987: *A Practical Approach to Sedimentology*. Allen & Unwin, London, 154-183.
- MARUI, A., YASUHARA, M., TANAKA, T. and TAKAYAMA, S., 1984: A micro-computer automatization system for the particle size analysis. *Hydrology*, **14**, 61-66.
- 森山昭雄, 1976: 沖積平野および浅海底の地形と粒度組成 その1—フルイと光透過法の組合せによる細粒堆積物の粒度分析法について—。愛知教育大学研究報告, **25**, 1-10.
- NELSEN, T. A., 1983: Time- and method-dependent size distributions of fine-grained sediments. *Sedimentology*, **30**, 249-259.
- 斎藤文紀, 1985: C-Mダイアグラム上における細粒堆積物の基本分布。堆積学研究会報, **22/23**, 54-64.
- 佐藤任弘・奈須紀幸, 1956: 泥質の粒度分析(特にピベット法について)。堆積学研究, **13**, 6-9.